

DỰ BÁO TUỔI THỌ CÒN LẠI CỦA CÁC CỤM, CHI TIẾT TRÊN XE XÍCH QUÂN SỰ

FORECASTING THE REMAINING SERVICE LIFE OF ASSEMBLIES AND COMPONENTS IN MILITARY TRACKED VEHICLES

Nguyễn Minh Tiến*, Phạm Trung Kiên, Võ Tấn Phát

Học viện Kỹ thuật quân sự

*Email: minhhtien21998@gmail.com

TÓM TẮT

Dự báo tuổi thọ còn lại các cụm, chi tiết góp phần quan trọng vào việc nâng cao khả năng sẵn sàng chiến đấu cho xe xích quân sự. Dựa vào trạng thái kỹ thuật ở một thời điểm kiểm tra chẩn đoán bất kỳ, dự báo tuổi thọ còn lại cho biết trước khoảng thời gian tính từ thời điểm chẩn đoán tới khi các cụm, chi tiết đạt trạng thái giới hạn (trạng thái hỏng) trong điều kiện khai thác cho trước. Hiện nay có phương pháp dự báo tuổi thọ còn lại theo hàm ngoại suy tuyến tính và ngoại suy theo hàm lũy thừa. Sự thay đổi trạng thái kỹ thuật của các cụm, chi tiết theo thời gian hay theo khối lượng công tác có thể được đánh giá bởi sự thay đổi của một loạt các thông số kỹ thuật như ứng suất, lượng tiêu hao nhiên liệu, độ mòn, khe hở, tiếng ồn, hiệu suất và độ chính xác, trong đó đối với đa số các cụm, cặp chi tiết thì sự mài mòn bề mặt tiếp xúc của các cặp chi tiết chuyển động có ma sát là nguyên nhân chủ yếu làm các thông số kỹ thuật khác thay đổi theo hướng xấu đi. Dự báo tuổi thọ còn lại thực chất là dự báo trạng thái mài mòn của các cặp ma sát ảnh hưởng tới tuổi thọ của các cơ cấu, hệ thống trên xe xích quân sự.

Từ khóa: Dự báo; Tuổi thọ còn lại; Xe xích quân sự; Ngoại suy tuyến tính.

ABSTRACT

Forecasting the remaining service life of assemblies and components plays an important role in improving the combat readiness of military tracked vehicles. Based on the technical condition determined at any diagnostic inspection time, the remaining service life forecast provides an estimate of the time interval from the moment of diagnosis to the point at which the assemblies or components reach their limit state (failure state) under given operating conditions. Currently, there are forecasting methods based on linear extrapolation functions and on power-law extrapolation functions. Changes in the technical condition of assemblies and components over time or with accumulated workload can be assessed through variations in a number of technical parameters such as stress, fuel consumption, wear, clearances, noise, efficiency, and accuracy. For most assemblies and mating component pairs, surface wear of the contact areas in moving friction pairs is the main cause leading to the deterioration of other technical parameters. In essence, forecasting the remaining service life is forecasting the wear state of friction pairs that affect the service life of mechanisms and systems in military tracked vehicles.

Keywords: Prediction; Remaining service life; Military tracked vehicle; Linear extrapolation. 

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hiện nay, các trang bị xe xích quân sự trong quân đội Việt Nam chủ yếu có nguồn gốc từ Liên xô cũ, Liên bang Nga ngày nay. Trong quá trình khai thác, các cụm, chi tiết có sự thay đổi về tình trạng kỹ thuật theo hướng xấu đi. Chính vì vậy, dự báo tuổi thọ còn lại của các cụm, chi tiết của xe xích quân sự đóng vai trò quan trọng trong điều kiện các trang bị chủ yếu có nguồn gốc từ nước ngoài. Kết quả dự báo tuổi thọ làm cơ sở khoa học cho việc tối ưu hóa khai thác, xây dựng chế độ bảo dưỡng và lập kế hoạch sửa chữa hợp lý nhằm nâng cao hiệu quả sử dụng và kéo dài tuổi thọ xe xích quân sự.

Sự suy giảm trạng thái kỹ thuật của xe xích quân sự theo thời gian chủ yếu do quá trình mài mòn các cặp chi tiết có ma sát, làm thay đổi các thông số làm việc như độ chính xác, độ tin cậy. Do tính chất ngẫu nhiên của quá trình này, bài toán dự báo tuổi thọ còn lại mang bản chất xác suất và phụ thuộc chủ yếu vào độ chính xác của dữ liệu chẩn đoán hiện tại cũng như khả năng ngoại suy quy luật biến đổi trong quá khứ.

2. PHƯƠNG PHÁP DỰ BÁO TUỔI THỌ CÒN LẠI

Giả sử các thông số chẩn đoán (như độ dày của răng bánh sao chủ động, lượng tiêu hao dầu bôi trơn, v.v.) của các cụm, chi tiết đo được trong quá trình bảo dưỡng kỹ thuật xe xích quân sự. Sử dụng thông tin về các thông số đó, ta có thể tính toán tuổi thọ còn lại trong trường hợp hư hỏng dần dần theo các phương pháp:

- Thông qua hàm ngoại suy, nếu biết được dạng hàm và một số hằng số nhất định, đồng thời có sẵn dữ liệu cần thiết về quá trình thay đổi tham số chẩn đoán;

- Bằng cách sử dụng mô hình phân phối

xác suất hai tham số, trong đó quá trình thay đổi tham số chẩn đoán cho phép xác định dạng của quy luật phân phối và xác suất đạt đến trạng thái giới hạn.

Để đánh giá tuổi thọ còn lại của các cụm, chi tiết trên xe xích quân sự, sử dụng công thức sau [1]:

$$S_o = S_i \left(\sqrt{\frac{t_{np} - t_H}{t_i - t_H}} - 1 \right) \quad (1)$$

Trong đó: S_o – Thời gian khai thác tại đó tham số đạt đến giá trị giới hạn t_{gh} ;

S_i – Thời gian khai thác tại thời điểm đo tham số;

t_{bd}, t_i – Giá trị ban đầu và giá trị đo được của tham số.

Trong khuyến nghị về việc áp dụng công thức (1) có nêu rằng $\alpha = 0,8 - 2,5$ và đối với mức tiêu hao dầu bôi trơn trong các tế động cơ: $\alpha = 2$, đối với độ hở của cơ cấu thanh truyền - trục khuỷu: $\alpha = 1,4$, đối với áp suất khí trong các tế: $\alpha = 1,3$.

Công thức (1) chỉ là một trường hợp đặc biệt của một quan hệ xác suất tổng quát. Khi sử dụng quy luật phân phối chuẩn hai chiều vốn phản ánh đúng bản chất vật lý của quá trình tích lũy hư hỏng [2] thì các công thức cơ bản của phương pháp dự báo xác suất sẽ là [3]:

$$\bar{t}_0 = \bar{t}(S_0) + r(S_i, S_0) \cdot \sigma(S_0) / \sigma(S_i) \cdot [t_i - \bar{t}(S_i)] \quad (2)$$

$$\sigma_{t_0} = \sigma(S_0) \sqrt{1 - r^2(S_i, S_0)} \quad (3)$$

Trong đó:

- $\bar{t}_0, \sigma(S_0)$ – Giá trị trung bình và độ lệch chuẩn của tham số t_0 tại thời điểm khai thác S_0 , tại đó xác định tuổi thọ còn lại (tức là thời điểm S_i khi tham số đo được là t_i);

- $\overline{t(S_i)}$, $\overline{t(S_0)}$, $\sigma(S)$, $\Phi(S_0)$, $r(S_i, S_0)$ –

Giá trị trung bình, độ lệch chuẩn và hệ số tương quan của tham số t tại thời điểm khai thác S_i và S_0 .

Xác suất không đạt tới trạng thái giới hạn được xác định theo công thức:

$$P(t < t_{np}) = 0,5 \cdot [\Phi(t_{np} - \overline{t_0} / \sigma_{t_0} \sqrt{2}) - \Phi(\overline{t_0} / \sigma_{t_0} \sqrt{2})] \quad (4)$$

Trong đó: Φ là hàm Laplace ở dạng bảng tra cứu.

Như vậy, bằng phương pháp này có thể thu được kết quả dưới dạng xác suất không đạt tới trạng thái giới hạn khi thiết bị được khai thác đến thời điểm S_0 . Lượng thông tin tiên nghiệm cần thiết để áp dụng phương pháp này bao gồm các giá trị điểm của $\overline{t(S_i)}$, $\overline{t(S_0)}$, $\sigma(S_i)$, $\sigma(S_0)$ hoặc trong trường hợp tổng quát hơn, các hàm $t = t(S)$, $\sigma = \sigma(S)$, $r = r(\Delta S)$.

Yếu tố có ảnh hưởng quyết định đến độ chính xác của dự báo là hệ số tương quan r .

Trong trường hợp $r_{i0} = 0$, như chỉ ra trong công thức (2) và (3), thì việc có thêm thông tin bổ sung không mang lại lợi ích làm tăng độ chính xác của dự báo bởi vì $\overline{t_0} = \overline{t(S_i)}$, $\sigma_{t_0} = \sigma_t$; nếu $r = 1$, thì $\sigma_{t_0} = 0$ và công thức (2) sẽ đưa ra câu trả lời dứt khoát cho câu hỏi liệu có đạt hay không đạt giá trị giới hạn của tham số tại thời điểm S_0 .

Mối quan hệ xác định trong công thức (1) là trường hợp riêng của phương pháp xác suất khi áp dụng vào quá trình tích lũy hư hỏng với các điều kiện hạn chế sau:

- Quan hệ $\overline{t(S)}$ được đưa về dạng $\overline{t(S)} = \alpha \sqrt{S}$ tức là giới hạn tới hạn $S_\alpha = \sqrt{S}$;

- Độ lệch chuẩn không thay đổi theo thời gian sử dụng nghĩa là $\sigma(S_i) = \sigma(S_0) = \text{const}$;

- Hệ số tương quan $r(S_i, S_0) = 1$ trong toàn bộ dải khai thác.

Tuy nhiên, phân tích các quá trình tích lũy hư hỏng trong các cụm đặc trưng của xe xích quân sự (như động cơ, hệ thống truyền lực, phần vận hành, v.v.), cho thấy rằng với $\sigma(S) \neq \text{const}$ và $r \neq 1$ thì để dự báo chính xác, thông thường cần sử dụng công thức (2) và (4). Khi dự báo tuổi thọ còn lại của các cụm như động cơ hay hệ thống truyền lực thông thường không thể đo trực tiếp tham số xác định như tổn thất công suất hay mài mòn ổ bi, ổ trượt, chi tiết ma sát là nguyên nhân gây ra hư hỏng. Trong các trường hợp này, có thể đánh giá gián tiếp thông qua sự thay đổi của các tham số liên quan. Ví dụ như khi bạc xi lanh – xéc măng bị mài mòn, áp suất khí các-te, độ tiêu hao dầu và hàm lượng kim loại trong dầu sẽ tăng lên.

Trong trường hợp tổng quát, khi không thể đo được tham số t trực tiếp thì tại S_i và S_0 , tiến hành đo các đại lượng phụ thuộc y_i và y_0 , sau đó áp dụng công thức của luật chuẩn nhiều chiều [3], trong đó các công thức cho giá trị trung bình và độ lệch chuẩn được sử dụng:

$$\overline{X} = \overline{X} + \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \cdot \frac{r_{xy} - r_{xz} \cdot r_{yz}}{1 - r_{yz}^2} [y_i - \overline{y}] + \frac{\sigma_x(S_i)}{\sigma_y(S_0)} \cdot \frac{r_{xz} - r_{xy} \cdot r_{yz}}{1 - r_{yz}^2} [z_i - \overline{z}] \quad (5)$$

$$\sigma_0 = \sigma_x \sqrt{[1 + 2 \cdot r_{xy} \cdot r_{xz} \cdot r_{yz} - (r_{xy}^2 + r_{xz}^2 + r_{yz}^2)] / (1 - r_{yz}^2)} \quad (6)$$

Việc tính toán xác suất tham số vượt quá giá trị giới hạn cho phép được thực hiện theo công thức (4).

Các công thức (5) và (6) cho thấy rằng độ chính xác của dự báo trong trường hợp này chủ yếu phụ thuộc vào các giá trị của hệ số

tương quan r_{xy} , r_{yz} , r_{xz} . Hệ số tương quan đánh giá mức độ liên kết tuyến tính giữa hai giá trị của đại lượng ngẫu nhiên hoặc giữa hai đại lượng khác nhau. Tuy nhiên khi $r = 0$, các đại lượng vẫn có thể liên kết với nhau thông qua một mối quan hệ phi tuyến.

Điều này giải thích sự tương đối độc lập của các hệ số r_{xy} , r_{yz} , r_{xz} . Việc cần thiết phải đo đồng thời hai đại lượng y và z được xác định bởi giá trị của hệ số r_{yz} . Do đó, hiệu quả cao nhất đạt được khi $r_{yz} = 0$.

$$\sigma_0 = \sigma_x \sqrt{[1 - r_{xy}^2 - r_{xz}^2]} \quad (7)$$

Khoảng giá trị có thể có của các hệ số r_{xy} , r_{yz} , r_{xz} được xác định từ công thức (6), lưu ý rằng số $r_{xy} = r_{xz}$ nếu số $r_{yz} = 1$ và biểu thức dưới dấu căn trong (6) phải lớn hơn 0:

$$r_{xy} \cdot r_{xz} \sqrt{(1 - r_{xy}^2)(1 - r_{xz}^2)} < r_{yz} < r_{xy} \cdot r_{xz} + \sqrt{(1 - r_{xy}^2)(1 - r_{xz}^2)} \quad (8)$$

Vậy khi $r_{xy} = r_{xz} = 1$ và $r_{yz} = 1$ tức là trong trường hợp này việc có thêm tham số thứ hai là không cần thiết. Các công thức tương tự như (5) đến (8) cũng có thể được xây dựng cho ba hoặc nhiều hơn các tham số chẩn đoán. Mối quan hệ giữa các hệ số tương quan cho phép đánh giá hiệu quả của việc bổ sung thêm thông tin.

3. KẾT QUẢ

Kinh nghiệm khai thác xe xích quân sự cho thấy hệ số tương quan r của quá trình tích lũy độ mòn thường luôn lớn hơn 0. Nghĩa là mẫu vật, dù có đặc điểm tốt hơn hay xấu hơn, thể hiện từ giai đoạn đầu sử dụng, thường sẽ duy trì xu hướng này trong quá trình khai thác về sau. Trong trường hợp này, có thể giả định rằng: $r = e^{-\alpha \cdot S}$, trong đó $r = r_0$ là giá trị ban đầu và α là hệ số điều chỉnh tốc độ suy giảm liên kết tương quan về mức ổn định. Tốc độ suy giảm

này phụ thuộc vào tính chất của vật liệu cơ khí. Giả thuyết này được sử dụng để dự báo thời gian sử dụng còn lại mất xích của xe xích quân sự.

Dữ liệu về độ mòn vấu bám đất của mắt xích có các thông tin tiên nghiệm sau:

- Tại quãng đường $S = 3000$ km, chiều cao trung bình của vấu bám đất là $\bar{t}(S = 3,0) = 24$ mm, độ lệch chuẩn $\sigma(S = 3,0) = 1,0$ mm;

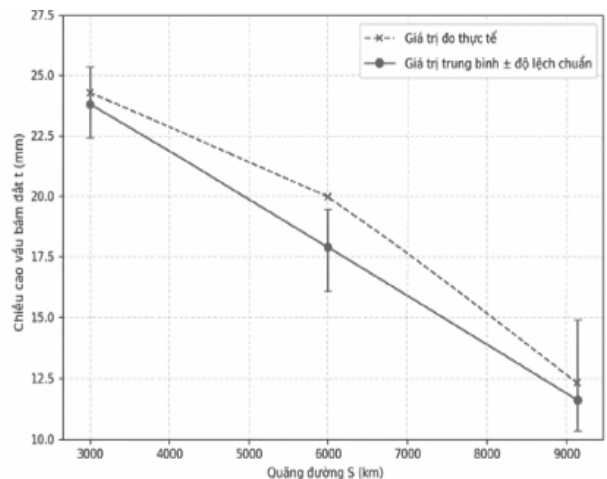
- Tại $S = 6000$ km và $S = 9000$ km, chiều cao trung bình của vấu bám đất là 18 mm và 12 mm, độ lệch chuẩn là 2 và 3 mm tương ứng;

- Hệ số tương quan r ổn định sau khoảng $S = 1000$ km, do đó coi như $r = \text{const}$;

- Phân bố chiều cao vấu bám đất t tại $S = \text{const}$ có thể coi là phân bố chuẩn (Gaussian).

Kết quả đo chiều cao vấu bám đất trên một xe cụ thể như sau:

- Tại $S = 3000$ km, chiều cao $t = 26$ mm;
- Tại $S = 6000$ km, chiều cao $t = 20$ mm.



Hình 1. Đồ thị độ mòn vấu bám đất theo quãng đường

Dựa trên các dữ liệu này và thông tin tiên nghiệm, cần xác định xác suất đạt đến giá trị giới hạn của các cụm, chi tiết là $t_{gh} = 10$ mm. Xét hai trường hợp dự báo:

1) Sử dụng mô hình phân phối chuẩn hai biến (với $S = 6000$ và 9000 km);

2) Sử dụng ba điểm đo ($S = 3000, 6000$ và 9000 km).

Trong trường hợp đầu tiên sử dụng các công thức (2) và (3), trường hợp thứ hai áp dụng công thức (5) và (6).

$$t_0 = 12 + \frac{3}{2} \cdot 0.8 \cdot (20 - 18) = 14,4(mm);$$

$$\sigma = 3,0 \cdot \sqrt{1 - 0,64} = 1,8(mm);$$

$$t_0 = 12 + \frac{3}{2} \cdot \frac{0.8}{1+0.8} \cdot (20-18) + \frac{3}{1} \cdot \frac{0.8}{1+0.8} \cdot (26-14) = 16(mm);$$

$$\sigma = 3 \cdot \frac{1 + 2 \cdot 0,8 - 3 \cdot 0,8^3}{1 - 0,64} = 1,612(mm).$$

Việc bổ sung thông tin đã nâng cao độ chính xác lên $1,8/1,612 \approx 10\%$.

Xác suất không đạt đến trạng thái giới hạn của xích xe tăng theo công thức (4) trong phương án thứ nhất $P = 0,993$, còn trong phương án thứ hai $P = 0,9999$, nghĩa là sự khác biệt trong đánh giá cuối cùng là không đáng kể.

Xét việc dự báo thời gian sử dụng còn lại trong trường hợp “hỏng hóc đột ngột”. Trạng thái giới hạn trong các sự cố đột ngột thường phụ thuộc vào hai yếu tố ngẫu nhiên:

- Tính chất mỗi riêng biệt của vật liệu của chi tiết đang xét;

- Số chu kỳ làm việc đã hoàn thành.

Trình độ kỹ thuật đo lường hiện nay chưa cho phép đánh giá trực tiếp các đặc tính mỗi của từng chi tiết riêng lẻ. Do đó, việc dự báo thường dựa trên các đặc trưng tổng quát, chẳng hạn như đường cong Wöhler và hệ số biến thiên số chu kỳ đến khi phá hủy.

Số chu kỳ đã làm việc có thể đo bằng các thiết bị đếm, ghi lại biên độ ứng suất hoặc các đại lượng tỷ lệ với nó.

Như vậy, độ chính xác trong dự báo sự cố “đột ngột” sẽ thấp hơn so với sự cố “dần dần”, vì trong trường hợp này thông tin tiên nghiệm chỉ bổ sung dữ liệu về tải trọng thực tế, chứ không bao gồm khả năng chịu tải riêng biệt của vật liệu làm ra chi tiết. Khi dự báo xác suất xảy ra sự cố “đột ngột” do tích lũy môi, có thể sử dụng các công thức sau [4]:

$$P(S) = 1 + 0,5H \cdot [\Phi(\frac{\alpha S_1}{S} - \bar{I} / \sigma \sqrt{2})] \quad (9)$$

Trong đó:

$$H = \frac{2}{1 + \Phi(\frac{\bar{I}}{\sigma_1 \sqrt{2}})}$$

$$\bar{I} = \int_{\tau_{od}}^{\tau_{max}} m \cdot e^{-2,3 \cdot t \cdot g \cdot \bar{N}} d\tau \quad (10)$$

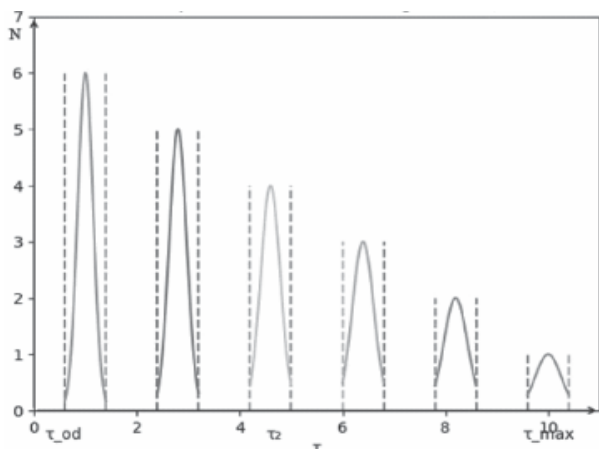
$$\sigma_1^2 = \frac{2}{\lambda} \int_{\tau_{od}}^{\tau_{max}} (m \cdot e^{-2,3 \cdot t \cdot g \cdot \bar{N}})^2 (e^{5,3 \cdot v^2 \cdot t \cdot g \cdot \bar{N}^2} - 1) d\tau \quad (11)$$

Các đại lượng trong công thức như τ_{max} , τ_{od} , λ , $vtg\bar{N}$ là đặc trưng của vật liệu và áp dụng chung cho tất cả các chi tiết được sản xuất theo cùng một bản vẽ kỹ thuật.

Đại lượng $m = N_i \cdot g(\tau)$ có tính chất đặc biệt cho từng trường hợp và có thể được ghi nhận thông qua thiết bị tính chu kỳ (theo mức ứng suất $\tau_{od} - \tau_i, \dots, \tau_i - \tau_{max}$) trong suốt quá trình khai thác xe S_i .



Vì trong thực tế các tích phân trong công thức (10) và (11) thường được thay thế bằng tổng nên số chu kỳ n_i trong mỗi khoảng (hình vẽ) có thể coi là biến ngẫu nhiên phân bố chuẩn.



Hình 2. Biểu đồ số chu kỳ và độ phân tán trong mỗi khoảng $\bar{n}$

Theo công thức (2)-(4), ta xác định $\bar{n}_0$, σ_{n0} , N_i là số chu kỳ dự báo được trong từng khoảng tải ứng với xác suất cố định trước ví dụ $P = 0,9$ ($0 < n_i < n_{\max}$). Khi đã biết N_i , ta có thể dùng công thức (9) để đánh giá xác suất không hỏng của chi tiết. Trong công thức này tử số của biểu thức $a.S_i^3$ thể hiện quy mô và thời lượng làm việc mà tại đó xác định được N_i , tức là khi $\frac{\alpha S_i}{S} = 1$, thì $N_i = N$.

Để dự báo cần xây dựng các hàm phụ thuộc $\bar{n}_i(S)$, $\sigma_{ni}(S)$ và $r_n(\Delta S)$. Việc áp dụng lý thuyết mài mòn trong dự báo hỏng hóc do mỏi có thể có vẻ không hợp lý vì độ phân tán chủ yếu do tính chất vật liệu, trong khi điều kiện sử dụng chỉ ảnh hưởng đến mức độ trung bình của mòn. Tuy nhiên, sự đồng nhất của mặt đường và tính lặp lại trong khai thác bởi xe xích quân sự, cho phép giả định rằng các yếu tố ảnh hưởng đến phân bố chu kỳ mỏi là nhiều nhưng không yếu tố nào chiếm ưu thế tuyệt đối. Giả thiết khả thi nhất cho các tham số là: $\bar{n}_i(S) = k.S_i.\sigma_n =$

const ; $r_n = 1$. Dạng phụ thuộc này chỉ phù hợp khi điều kiện khai thác không thay đổi. Dữ liệu về điều kiện khai thác trong tương lai không bắt buộc phải biết khi dự báo tuổi thọ còn lại đối với bất kỳ phương pháp nào đã trình bày.

4. KẾT LUẬN

Việc dự báo tuổi thọ còn lại của các cụm, chi tiết của xe xích quân sự trong trường hợp hư hỏng “suy giảm dần” là khả thi nếu có thông tin về sự thay đổi giá trị trung bình của tham số kỹ thuật, độ lệch chuẩn và hệ số tương quan trong giới hạn chu kỳ khai thác đã xác định. Hiệu quả của phương pháp dự báo đối với nhiều tham số chẩn đoán kỹ thuật phụ thuộc vào mức độ liên kết tương quan giữa các tham số đó. Việc khai thác hiệu quả các hệ số tương quan đóng vai trò quyết định trong việc nâng cao độ chính xác dự báo. Dự báo tuổi thọ trong trường hợp hư hỏng đột ngột cho kết quả kém chính xác hơn so với hư hỏng “suy giảm dần” do thông tin ban đầu chỉ phản ánh tải trọng mà không phản ánh khả năng chịu tải cụ thể của vật liệu chế tạo. Để dự báo chính xác trong trường hợp này cần phải có thông tin về số chu kỳ tải trọng thực tế đã tích lũy. ♦

Ngày nhận bài: 26/4/2026

Ngày phản biện: 05/5/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. “Hướng dẫn phương pháp dự báo tình trạng kỹ thuật của máy kéo”. NXB. Kolos, Matxcova, 1972.
- [2]. Gerdtakh I. B., Kordonsky Kh. B., “Các mô hình hỏng hóc”. NXB. Sovetskoe Radio, Matxcova, 1966.
- [3]. Phan Văn Khôi, “Cơ sở đánh giá độ tin cậy”. NXB. Khoa học và Kỹ thuật, năm 2001.
- [4]. Nguyễn Ngọc Ban, Nguyễn Hoàng Nam (1992) dịch, “Khai thác trạng bị Tăng thiết giáp”. Học viện Kỹ thuật quân sự.